

階段状地形の後流（第2部） 後流渦中の拡散（風洞実験）*

安 枝 伸 子**

要 旨

階段状地形の風下側にできる後流中の統計的な固定渦について、渦領域内の地表面を線源とする拡散実験を行なった。第I部でこの地形を用いて渦内部の乱流構造を調べた結果、地形付近で高い濃度を示すことが予想された。今回の拡散実験の結果、放出されたトレーサーガスは、地形付近で高濃度を示し、渦全体にわたっての濃度分布は、この渦の統計的な形状をよく反映していることがわかった。さらに、渦領域内の空気の換気時間についても考察した。

1. はじめに

階段状地形の風下側の後流中の地形近傍にできる統計的な固定渦（以後これを後流渦と称す）について、後流渦中の地表面に線源がある場合、そこから放出されたトレーサーガスがどのように拡散されるかを調べた。

今回使用した地形の後流渦内の乱流構造は、第I部で風洞実験によって調べてある。平均風速は、 x 方向の成分 u も z 方向の成分 w も、地形付近では相対的に小さく、地表付近での u 成分は一般流と逆向きになっていた。また、乱れのエネルギーも、地形付近では風下側と比較して、 x 成分および z 成分とも、一桁近く小さくなっていた。

上述のような平均流および乱れのエネルギーの分布状態のもとで、この地形の風下側の後流渦内の地表面に線源をおいて、トレーサーガスを放出した場合を考える。放出されたトレーサーガスは逆流によって地形の方へと流されるが、地形付近では平均風速も乱れも小さいために、流されてきたトレーサーガスの動きがにぶくなり、高い濃度を示すことが予想される。ここでは、実際に風洞内でトレーサーガスを放出して拡散実験を行ない、濃

度分布を調べた結果を報告する。さらに、この渦領域からトレーサーガスがなくなるのに要する時間、すなわち換気時間についても調べてみた。

Arya ら (1981 a, 1981 b) は、低い急峻な尾根が境界層内の平均流および乱流構造ならびに物質の拡散におよぼす影響について、風洞実験を行なっている。しかし、本研究で対象としているような地形の極く近傍、すなわち cavity region 内における濃度分布の状態ならびにこの領域の空気の換気時間についての研究は、調査をした範囲ではみあたらない。また、今回使用した地形は、複雑な階段状地形であるが、第I部で実際の地形で観測し、その地形の1/100の大きさの模型を作製して風洞実験を行なった際に使用したものをそのまま用いた。流れについては、相似の条件を満足させて、野外と風洞とで相似にしてあるが、野外での拡散実験は行なっていないので、拡散に関しては野外と比較できない。

2. 実験方法

使用した風洞は、大きさ $30 \times 30 \times 300$ cm の吸込式である。この風洞内で、地形の風下側の地表面に線源を置き、プロパンガスを放出して、各点で濃度を測定した。

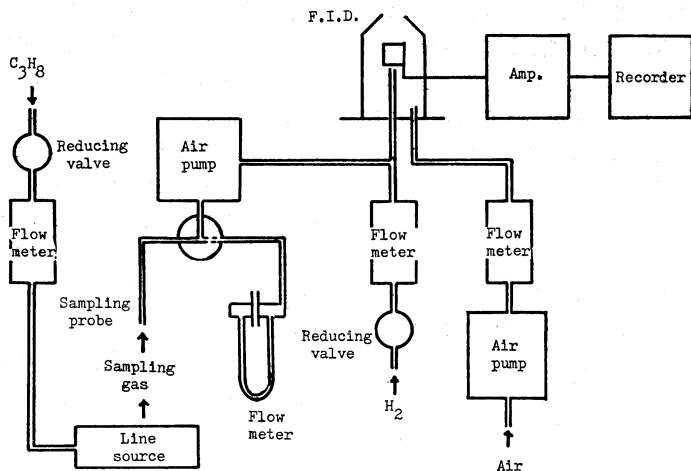
濃度測定には、第1図に示すような流路をもつ改良ガスクロマトグラフィーを用いた。図中の Flame Ionization Detector (F.I.D.) の原理を簡単に説明しておく。採集されたプロパンガスは、高温で燃焼している水素炎中でイオン化され、プロパンガスの量に応じて、コレクターにイオン電流が流れる。この電流を増幅して検出す

* The Structure of Recirculating Flow in the Region Close to Backward Multi-Step Part II —Diffusion in the Cavity Region— (Wind Tunnel Experiment).

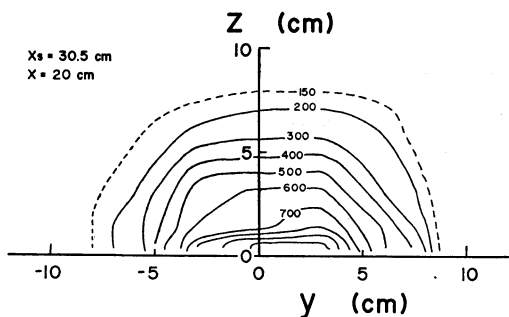
** Nobuko Yasueda, お茶の水女子大学大学院。

—1982年2月20日受領—

—1982年4月12日受理—



第1図 濃度測定装置と流路徑.

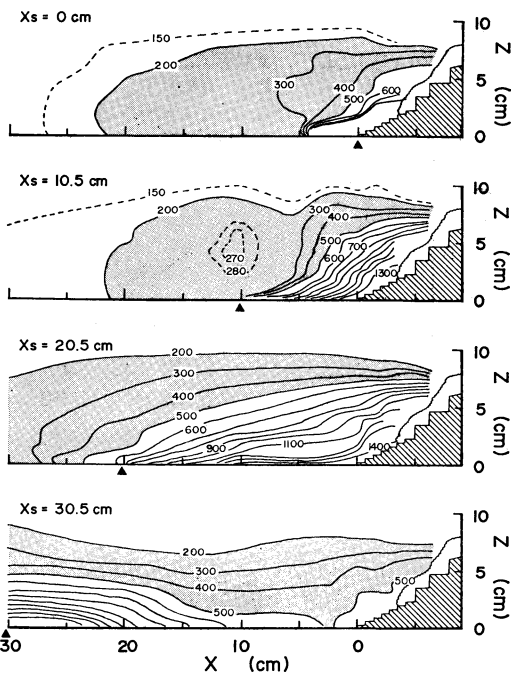


第2図 横方向の濃度分布,

る。F.I.D.の出力として検出されるプロパンガスの濃度は、既知の濃度に薄めたプロパンガスで検定曲線をあらかじめ作成しておいて、この検定曲線から求める。ここで、水素量の変化はF.I.D.で検出される微小電流に大きな影響をおよぼすので、流量計を通して随時その流量を監視し制御した。また、放出物質であるプロパンガスも同様に監視し制御した。

放出されたプロパンガスの採集には、内径2.1mmの真鍮のパイプを使用した。このプローブを用いて、風洞内の測定点の空気を30cc/minの割合でポンプで吸引し、F.I.D.へと送り込む。第1図中のU字管は、オフィスを使ったマンメータで、サンプリングガスの流量を決定するのに用いている。

次に、プロパンガスを地上から放出する線源について述べる。線源は、幅1mm、長さ20cmの隣青銅ででき



第3図 線源位置 x_s を変えた濃度分布.

たスリットになっていて、これを地表面に埋め込み、一定の割合で純粋なプロパンガスを放出する。今回の実験では、近似的に二次元流を仮定してこの線源を用いているが、濃度分布に二次元的性があるかどうかあらかじめ調べてみた。 $x = 20$ cm における yz 面内の濃度分布は、

第2図に示すような形になっている。実験に使用している地形は、草が植えてあり、横方向に完全に一樣な形にはなっていないので、横方向の濃度分布は完全な左右対称ではない。しかし、第2図の結果からみて、風洞の中心付近では二次元性を仮定してもよいと思われるので、以下の測定は風洞の中心線上で行なった。

3. 実験結果

以下の議論において、 $x-z$ 座標を、地表面上の階段の始まる点を原点として、一般流の方向を x 方向の正方向、鉛直上方を z 方向の正方向として定義する。

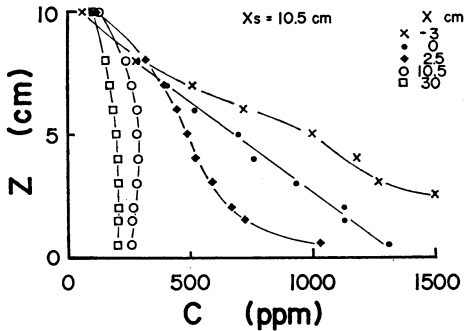
3.1. 濃度分布

一般に、地形の影響を受ける濃度分布は線源の位置によって異なった様子を示す。今回の実験では、線源の高さは $z=0$ cm すなわち地表面とし、線源位置 x_s (原点から測定した風下距離) の変化による濃度分布の違いを調べた。

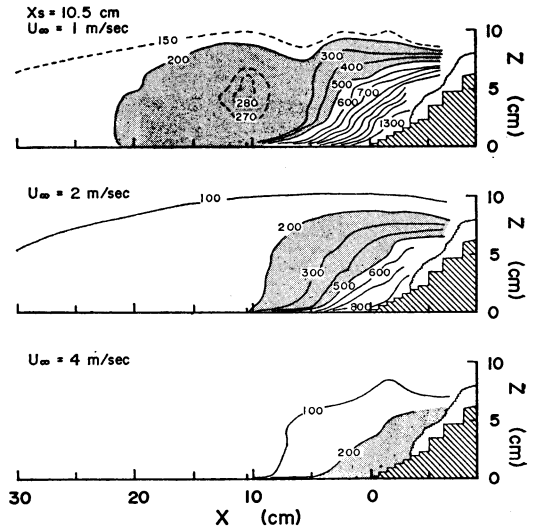
風洞風速 U_∞ を 1 m/sec、放出するプロパンガスの量を 30 cc/min に固定して、4種類の線源位置について得

た濃度分布を第3図に示す。図中の等濃度線に記入してある数字は ppm の単位で、実線は 100 ppm ごとである。放出しているプロパンガスの量が一定なので、各々の図の濃度はそのまま比較して差しつかえない。また、比較がし易いように 200 ppm と 500 ppm の等濃度線の間にはスクリーンを入れてあるが、この濃度に特別な意味は含まれていない。さらに、 $x_s=0$ cm の場合に、階段付近で 3000 ppm という高い濃度が検出され、等濃度線が密集して記入できないために図中では空白になっている。

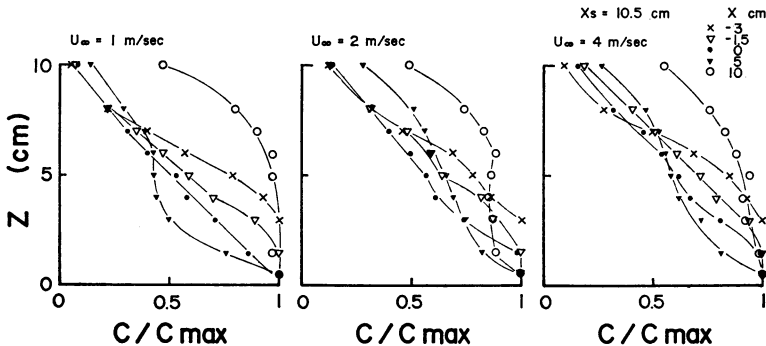
第3図から、線源位置が $x_s \leq 20.5$ cm であれば、階段およびその付近で高い濃度が検出されることがわかり、平均流、乱れの分布などの様子から予想していた分布と一致する。ただし、線源位置の風下距離が大きい



第4図 鉛直濃度分布。



第5図 風洞風速 U_∞ を変えた濃度分布。



第6図 最大濃度 C_{max} で規格化した鉛直濃度分布。

$x_s = 30.5 \text{ cm}$ の場合には、線源付近が相対的に高い濃度を示している。これは、線源が流線の再付着点に近く、風上側に向かって流れにくいとめと考えられる。一方、線源の風下側においては、いずれも風上側より低い濃度を示す傾向がある。

ここで、 $x_s = 10.5 \text{ cm}$ の場合の鉛直濃度分布を第4図に示す。線源および線源より風下側の位置（○および□印）では、濃度は z 方向にはほぼ様な分布を示し、地形に近づくにつれて z 方向の濃度変化が大きくなり、高濃度になってゆく様子がわかる。

このように、異なった x_s に対する濃度分布は、それぞれ違った様子をしているが、いずれも、線源の後流渦の統計的形狀から推定できる分布を示しており、本実験においては、後流渦が全体的な濃度分布を支配していると考えられる。

次に、線源位置を $x_s = 10.5 \text{ cm}$ に固定し、風洞風速を $U_\infty = 1, 2, 4 \text{ m/sec}$ と変化させた場合の濃度分布を第5図に示す。この実験で放出しているプロパンガスの量は 30 cc/min で、前述の実験と同じ割合である。

風速を大きくすると、検出される濃度は全体的に低くなり、高い濃度を示す領域が地形に近寄ったような分布となる。しかし、地形付近の等濃度線の形状は大体類似している。つまり、風速が大きくなると、全体の濃度は低く押えられるが、濃度分布への地形の影響は同様な形で現われるといえる。

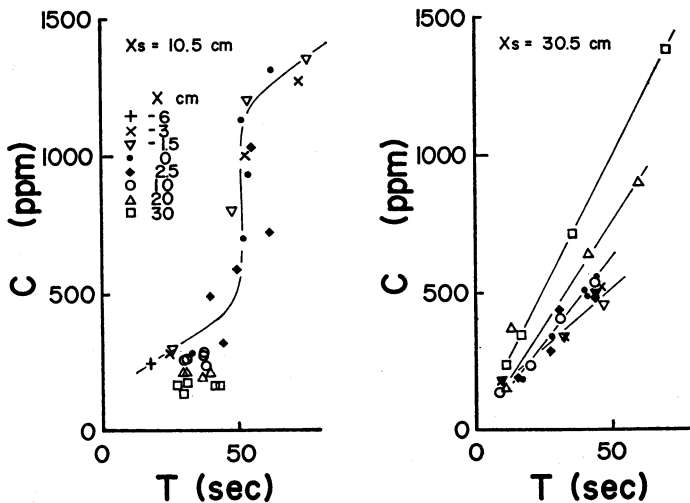
ここで、この風速を変化させた3つの濃度分布に対し、各濃度をそれぞれの場合に検出された最大濃度 C_{max}

で規格化して、その鉛直分布を求めた結果を第6図に示す。各風下距離 x に対する C/C_{max} の鉛直分布は、比較に用いたこれらの風速の範囲で多少変化することがわかる。一方、後流渦の平均的流線は、第I部の結果から、この間の風速で変化し、風速が大きいと渦は鉛直方向に少し大きくなる。この渦の形と同程度の変化が、濃度分布の形の変化に現われている。

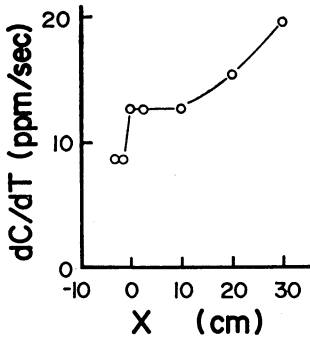
なお、濃度の測定において、各点の濃度は、 z が高い所ではあまり変動がないが、逆流の生じている領域、特に地形付近の下方ではかなり大きな変動があり、これを平均している。

3.2. 換気時間

ここで、後流渦から物質がぬけ出すのにどれくらいの時間を要するかを調べた。方法としては、線源からのプロパンガスの放出を急に止めて、その時点から測定点の濃度がバックグラウンド程度に下がるまでに要する時間を測定すればよい。しかし、プロパンガスの放出を止めたからの時間を考えるとき、サンプリングプローブの入口から水素炎までの管路の中に入っているサンプリングガスの分だけ時間の遅れが生じる。今回の実験ではこの時間の遅れが 20 sec であったので、記録紙上で、線源のプロパンガスを止めて濃度がバックグラウンドに下がるまでの時間から、この 20 sec を差し引いたものを換気時間 T と定義する。ただし、プロパンガスはここでいう換気時間の間その場で示していた高い濃度のままずっと残っているのではなく、最初の 20 sec の間に $1/10$ 以下の濃度に下がり、その後完全になくなるまでに時間 T を



第7図 濃度と換気時間。



第8図 濃度と換気時間の関係を示す直線の傾きと風下距離。

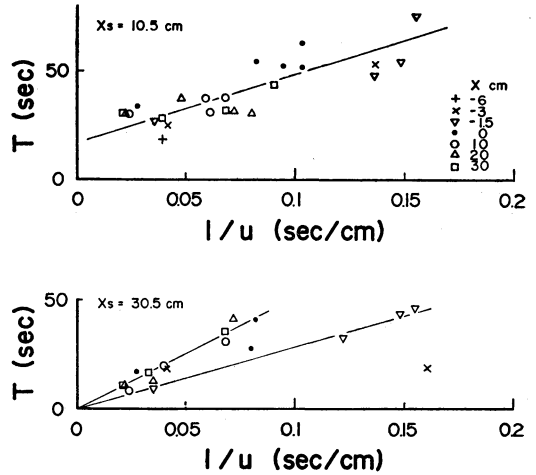
要するのである。

以上のような方法で、線源位置 $x_s=10.5\text{ cm}$ と 30.5 cm の2つの場合について、後流渦中の各点での換気時間を測定した。データは、各測定点につき5回測定したものを平均しているが、5回の測定にあまり大きなばらつきはなかった。

まず、換気時間と濃度の関係を見る。鉛直方向の各点の換気時間と濃度の関係を、各風下距離別に整理して第7図に示す。各 x で、濃度の高い点は、高さ z の低い点に対応している。

線源位置 $x_s=10.5\text{ cm}$ の場合の濃度と換気時間の関係が第7図中の左図である。線源より風下側では、高さによる濃度変化があまりなく、換気時間と濃度はほぼ一定値をとる。一方、線源より風下側ではばらつきはあるが、図中に示した曲線のようなひとつの傾向を持っている。すなわち、階段面上 2 cm から 5 cm 上方の、等濃度線の密集している領域で換気時間がほとんど変化しないために、このような曲線となった。

一方、線源位置が $x_s=30.5\text{ cm}$ の場合、各風下距離 x に対して、 $T \propto C$ の関係が得られた。さらに、この T と C の関係を示す直線の傾き dC/dT を求めて、 dC/dT と x の関係を調べたものが第8図である。風下距離の大きい所では、地形に近づくにつれて傾きが小さくなっていく。さらに地形の高さとほぼ等しい距離の $x=10\text{ cm}$ から階段の所までは、 dC/dT は一定値をとり、階段 ($x=0\text{ cm}$) を境にして、風上側で急に減少する。このような階段と平地との境での急な変化は、階段の影響として、第I部で調べたスペクトルなどにも現われていた。階段の途中では、同じ濃度の他の場所と比較して換気時間が一番長く、なかなか換気されないことが



第9図 平均風速と換気時間。

わかる。さらに、第7図の T と C の関係を直線的に延長したとき、他の場所 x では直線が原点を通るのに対して、階段の途中では原点を通らず他と異なっている。

次に、換気時間と平均風速の関係をみると、第9図のように、線源位置 x_s によらず、 $T \propto 1/u$ の関係があり、風速が大きい所では換気が早いという直観と一致した結果が得られた。

ここで、 $x_s=30.5\text{ cm}$ の場合、図中の直線を原点方向に延長すると、直線は原点を通り、風速が無限大になれば換気時間は零、つまり、瞬時に換気されることになる。また、この直線は、階段 ($x=0\text{ cm}$) を境にして風上側と風下側とで傾きが変化し、階段の途中 (∇ 印) では傾きがゆるやかになっている。つまり、風速が速くなくても換気時間があまり短くならない。これは、後流渦が階段の途中で閉じていて、プロパンガスがこの渦からぬけきれずに、再び渦内にもどってくるためであると考えられる。

一方、 $x_s=10.5\text{ cm}$ の場合は、直線のまわりのばらつきはあるが、直線の傾きは $x_s=30.5\text{ cm}$ の場合の階段の途中の値に近い。しかし、この直線は原点を通らない。つまり、風速が無限大になっても換気時間が零にはならず、ある時間の間プロパンガスが残っていることになる。ここでは、ばらつきも大きく、大きな風速の実際の測定値もないので、直線的に延長して議論することは危険であるが、 $x_s=10.5\text{ cm}$ の場合は、線源より風下側の上方でも渦が閉じているような濃度分布（第3図）を示しており、そのために換気に時間がかかると考えられ

る。地形後方の拡散問題に対して参考になると思う。

4. まとめ

以上の実験結果より、階段状地形の後流中の拡散に関して、以下のことが明らかになった。

- 1) 第I部で報告した平均流と乱れの様子から階段付近で高濃度を示すことが予想され、拡散実験によってこれが裏付けられた。一方、線源の風下側においては、いずれも風上側より低い濃度を示した。
- 2) 後流渦内の濃度分布は、後流渦の統計的形状に支配される。
- 3) 風速が1~4 m/secの範囲では、風速の変化による渦の形の変化と同程度の変化が、濃度分布の形の変化に認められた。
- 4) 換気時間は、その場所での濃度に比例し、風速に反比例する。

今回用いた地形から、後流渦を一般化し、理論的な扱いをすることは困難である。しかし、本研究の結果は、

最後に、本研究を行なうにあたり、いろいろ御指導、御助言をお願い致しました、お茶の水女子大学の根本茂教授に感謝の意を表します。また、お茶の水女子大学の坂上治郎名誉教授、気象研究所の加藤真規子氏には有用な御助言をいただき、永池雅人氏には模型作製に御協力いただきました。深く感謝致します。

文 献

- Arya, S.P.S., M.S. Shipman, 1981: An Experimental Investigation of Flow and Diffusion in the Disturbed Boundary Layer over a Ridge—I. Mean Flow and Turbulence Structure; *Atm. Env.*, **15**, 1173-1184.
- _____ and L.Y. Countney, 1981: An Experimental Investigation of Flow and Diffusion in the Disturbed Boundary Layer over a Ridge—II. Diffusion from a Continuous Point Source, *Atm. Env.*, **15**, 1185-1194.
- 安枝伸子, 1982: 階段状地形の後流の構造 第I部, *天気*, **29**, 633-641(647).

(641頁より続く)

3) 乱れによる運動量フラックスは、平均流による運動量フラックスの 10^{-5} ~ 10^{-3} 程度と小さく、後流渦中の運動量輸送は主として平均流によって行なわれる。

4) エネルギースペクトルの形は、 x 方向、 z 方向ともそれぞれひとつの形にまとめることができる。 $G_u(z)$ の形は、粗い平板上の十分発達した乱流境界層内のスペクトルの形と比較して、高周波側、低周波側とも減っていて、両者の乱流構造は明らかに相異している。

5) スペクトルのピークに対する渦径で、 $\lambda_{u\max}$ が最小値を取る高さは後流渦の中心線に一致している。また、階段付近では渦径は制限を受けている。

文 献

- Bradshaw, P. and F.Y.F. Wong, 1972: The Re-attachment and Relaxation of Turbulent Shear

Layer, *J. Fluid Mech.*, **52**, 113-135.

加藤真規子, 1980: バンドパスシグマメーターによるエネルギースペクトルについて, *気象学会予稿集*, **38**, 110.

Nemoto, S., 1968: Similarity between Natural Local Wind in the Atmosphere and Model Wind in a Wind Tunnel, *Pap. Met. Geophys.*, **19**, 131-230.

根本 茂, 1979: 高さの異なる円弧状二次元模型風下の流れの相似性について, *気象学会予稿集*, **36**, 20.

坂上治郎, 1975: 流れの可視化法, *気象研究ノート*, 124号.

Yasueda, N., S. Tanaka, and S. Nemoto, 1980: The Structure of Turbulent Flow over Regularly Arrayed Rough Surface (Wind Tunnel Experiment), *Nat. Sci. Rep. Ochanomizu Univ.*, **31**, 81-91.